



(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

# Offenlegungsschrift

## DE 42 07 169 A 1

(51) Int. Cl.<sup>5</sup>:

**B 23 K 26/02**

G 01 B 11/14

G 01 C 3/10

G 01 C 11/30

G 05 D 3/12

// B23K 26/08

(21) Aktenzeichen: P 42 07 169.0

(22) Anmeldetag: 6. 3. 92

(43) Offenlegungstag: 9. 9. 93

DE 42 07 169 A 1

(71) Anmelder:

Siemens Solar GmbH, 8000 München, DE

(74) Vertreter:

Fuchs, F., Dr.-Ing., Pat.-Anw., 81541 München

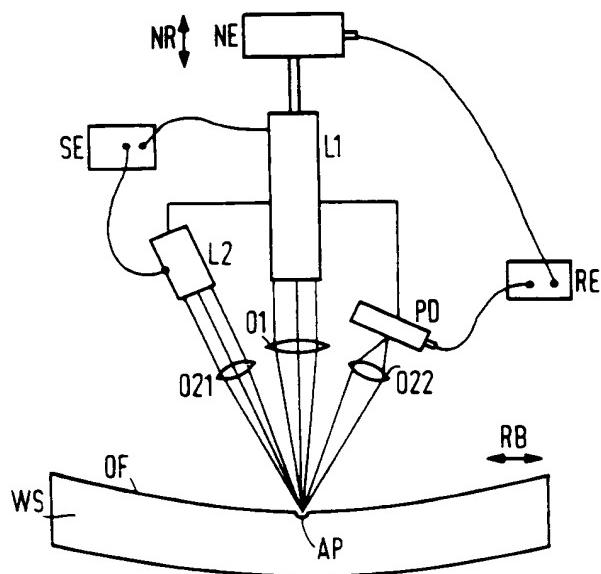
(72) Erfinder:

Goslowsky, Hans, Dr., 8018 Grafing, DE; Schulze, Friedrich-Wilhelm, Dr., 8088 Eching, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Laserbearbeitungsverfahren für ein Werkstück mit nicht ebener Oberfläche

(57) Für die Laserbearbeitung eines Werkstücks mit nicht ebener Oberfläche mittels eines gepulsten Lasers wird vorgeschlagen, den Abstand zwischen Werkstück und Laser mit einem optischen Sensor zu bestimmen und mit dem Meßsignal eine Nachführleinrichtung zur Neufokussierung zu regulieren. Zur Abstandsmessung wird insbesondere ein zweiter gepulster Laser gleicher Pulsfrequenz verwendet, der mittels einer Lock-in-Schaltung mit dem ersten Laser phasenverschoben synchronisiert ist, so daß eine Blendung des Abstandssensors durch das vom Bearbeitungslaser erzeugte Plasma vermieden wird.



DE 42 07 169 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 07. 93 308 036/285

6/50

## Beschreibung

Materialbearbeitungsverfahren wie zum Beispiel Bohren, Schneiden oder Schweißen, die zur Materialformung, zum Materialabtrag oder zum Verbinden von Materialien geeignet sind, lassen sich in einfacher Weise mit Lasern durchführen. Auch Oberflächenbearbeitung ohne Verformungen wie Aufschmelzen oder allgemein Erhitzen von Material sind mit Lasern möglich. Allgemein wird unter Laserbearbeitungsverfahren ein Verfahren verstanden, bei dem mit Hilfe eines Lasers Energie in das Material eines Werkstücks eingekoppelt wird.

Zur Bearbeitung eines Werkstücks kann der Laser stationär angeordnet sein, ist aber vorzugsweise relativ zum Werkstück beweglich. Da eine effektive Laserbearbeitung nur mit einer fokussierenden Optik möglich ist, muß bei der Bearbeitung stets auf die richtige Fokussierung des Laserstrahls relativ zum Arbeitspunkt auf dem Werkstück geachtet werden. Bei falscher Fokussierung und somit falschem Abstand des Lasers bzw. der Laseroptik zum Werkstück wird zu wenig oder zu viel Energie in das Material des Werkstücks eingekoppelt. Somit hängt Erfolg und Qualität des Bearbeitungsverfahrens von der richtigen Fokuseinstellung ab.

Bei Werkstücken mit ebener Oberfläche ist nur eine einmalige Einstellung der Fokussierung erforderlich, die während der gesamten Bearbeitung erhalten bleibt, wenn die Relativbewegung zwischen Laser und Werkstück ausschließlich horizontal bzw. in einer Ebene parallel zur Oberfläche des Werkstücks durchgeführt wird.

Bei unebenen oder gekrümmten Oberflächen ist neben der horizontalen Relativbewegung noch eine vertikale Nachführung des Lasers erforderlich. Diese kann bei regelmäßigen Werkstückoberflächen programmiert werden, was aber aufwendig und mit einem Unsicherheitsfaktor behaftet ist. Besser reproduzierbare Ergebnisse werden bei unregelmäßigen Oberflächen erhalten, wenn die Nachführung automatisch geregelt wird, wobei eine veränderte Fokussierung durch einen Abstandssensor erfaßt wird, der die Nachführinrichtung des Lasers steuert.

Aus geometrischen Gründen wird eine sichere Fokussierung nur dann erreicht, wenn die Abstandsmessung im Arbeitspunkt des Lasers auf der Werkstückoberfläche erfolgt. Dazu stehen eine Vielzahl berührungsloser physikalischer Meßmethoden zur Verfügung.

Bei optischen Meßverfahren tritt das Problem auf, daß der Abstandssensor vom Arbeitslaser bzw. von dem an der Werkstückoberfläche erzeugten Plasma gebunden und somit gestört wird.

Nicht optische Abstandssensoren bedürfen einer Spezialkonstruktion, die einen zentralen Durchgang für den Laserstrahl aufweisen, um symmetrisch um den Bearbeitungsort (Laserfokus) messen zu können.

Für Laserbearbeitungsverfahren bekannte und in der Fertigung eingesetzte Meßsysteme bestimmen den Abstand des Lasers zur Substratoberfläche auf kapazitivem Wege und werden in einer Entfernung von ca. 3 bis 5 mm vom Bearbeitungsort eingesetzt. Dadurch entsteht bei sphärischen Substraten ein Höhenfehler, der vom Steigungswinkel der Oberfläche abhängig ist. Außerdem bedingt der geringe Abstand des Sensors zur Werkstückoberfläche einen hohen Regelungsaufwand und führt an Stufen oder Kanten auf oder an dem Werkstück zu Problemen oder gar Kollisionen des Werkstücks mit dem Laser. Ein solches Meßverfahren ist daher nur für schwach gekrümmte Werkstücke anwendbar und reduziert die Bearbeitungsgeschwindigkeit. Au-

Berdem ist eine Verschmutzung des Sensors bei dem geringen Abstand vom Werkstück unvermeidlich und kann zu verfälschten Meßwerten führen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein 5 Laserbearbeitungsverfahren anzugeben, welches auch für Werkstücke mit unregelmäßiger oder stark gekrümmter Oberfläche anwendbar ist, gegenüber bekannten Verfahren eine erhöhte Bearbeitungsgeschwindigkeit zuläßt und welches eine hohe Meßgenauigkeit und somit eine hohe und reproduzierbare Qualität des Arbeitsergebnisses liefert.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1.

Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sowie eine 15 Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

Es wird ein optisches Sensorsystem vorgeschlagen, das die Pausen zwischen den einzelnen Laserpulsen zur Abstandsmessung nutzt. Die Lebensdauer des vom Laserpuls des ersten Lasers erzeugten Plasmas beträgt beispielsweise einige 10 Nanosekunden, so daß selbst bei hohen Repetitionsraten des ersten Lasers zwischen den Pulsen eine Blendung des optischen Sensors nicht erfolgt. Daher ist bis zu Pulsfrequenzen von  $10^5$  Hertz 20 eine sichere optische Abstandsbestimmung zwischen zwei Laserpulsen möglich.

Als Sensoren kommen alle bekannten Typen in Betracht. Es ist dabei lediglich zu beachten, daß die Messung phasenverschoben zwischen den einzelnen Laserpulsen erfolgt, bzw. daß bei kontinuierlicher Messung 25 die Auswertung des Meßsignals ausschließlich zwischen den Laserpulsen vorgenommen wird. Wird als Abstandssensor ein zweiter Laser in Verbindung mit einem Photodetektor verwendet, läßt sich mit einer entsprechend feinstufigen Nachführinrichtung eine sichere und genaue Fokussierung mit einer Toleranz von weniger als  $\pm 10 \mu\text{m}$  erzielen.

In vorteilhafter Weise ist dieser zweite Laser ebenfalls gepulst und weist die gleiche Pulsfrequenz wie der erste Laser auf. Durch eine einfache Elektronik, zum Beispiel mittels einer Lock-in-Schaltung kann der zweite Laser phasenverschoben mit dem ersten synchronisiert werden. Beide Laser können dabei von einer gemeinsamen Elektronik gesteuert werden.

In einer Ausgestaltung der Erfindung wird der zweite Laser mittels eines Spiegels in den Strahlengang des ersten Lasers eingekoppelt, wobei die Messung zum Teil über die Optik des ersten Lasers erfolgt.

Weniger aufwendig und variabler durchzuführen ist 50 es jedoch, die Messung mit einem vollständig vom ersten Laser getrennten Sensor durchzuführen, wobei der Strahlengang des ersten Lasers mit dem des zweiten Lasers einen spitzen Winkel bildet. In allen Fällen ist es jedoch erforderlich, den Sensor am ersten Laser zu fixieren oder anderweitig zu garantieren, daß der Sensor eine mit dem ersten Laser synchrone Relativbewegung zum Werkstück durchführt.

Als Meßverfahren zur Abstandsbestimmung wird zum Beispiel ein Triangulations- oder ein Schneidenverfahren eingesetzt, bei denen das Licht des zweiten oder Meßlasers in Abhängigkeit vom Abstand zum Werkstück unterschiedlich abgelenkt wird und wobei die Ablenkung über einen positionsempfindlichen Photodetektor bestimmt wird.

Im folgenden wird das erfindungsgemäße Verfahren 60 und eine dazu geeignete Anordnung anhand eines Ausführungsbeispiels und der dazugehörigen zwei Figuren näher erläutert. Dabei zeigt

**Fig. 1** die erfundungsgemäße Anordnung, während in **Fig. 2** das Pulsdiagramm der beiden Laser dargestellt ist.

#### Ausführungsbeispiel:

Bei der Herstellung von Dünnfilmsolarmodulen werden die stromgenerierende Halbleiterschicht und die stromableitenden Elektroden zunächst ganzflächig auf einem Substrat abgeschieden.

Da mit steigender Substratgröße die so erzeugte einzelne Solarzelle eine Verschlechterung in der Strom/ Spannungscharakteristik und im Wirkungsgrad aufweist, wird sie auf dem Modul in Einzelzellen unterteilt und integriert serienvorschaltet. Für diesen auch Strukturierung genannten Prozeß wird bei Solarmodulen aus amorphem Silizium (a-Si:H) als Werkzeug ein gepulster Laser verwendet, beispielsweise ein Nd-YAG Laser mit einer Frequenz von 5 bis 25 Kilohertz. In Abhängigkeit von der Brennweite des fokussierenden Objektivs, der Wellenlänge und der Energiedichte des eingesetzten Lasers müssen für den zur Strukturierung erforderlichen Materialabtrag enge Toleranzwerte bei der Nachführung des Lasers eingehalten werden, um eine saubere und enge Schnittführung beim Materialabtrag zu erhalten. Für das gewählte Beispiel sind zur Strukturierung eines a-Si:H Solarmoduls bei einer Brennweite des Objektivs von 60 mm Toleranzen von  $\pm 50 \mu\text{m}$  einzuhalten.

**Fig. 1** zeigt eine erfundungsgemäße Anordnung, bei der als Werkstück WS ein Dünnfilmsolarmodul mit gekrümmter Oberfläche OF mittels eines ersten Lasers L1 strukturiert wird. Dazu wird ein frequenzverdoppelter Nd-YAC Laser (532 nm) mit einer Repetitionsrate von 20 Kilohertz verwendet. Das Objektiv O1 im Arbeitspunkt AP auf der Oberfläche OF des Werkstücks WS. Ein zweiter Laser L2, zum Beispiel ein Heliumneonlaser oder eine Galliumarsenidlaserdioden (870 nm) wird mit einer zweiten Optik O21 ebenfalls im Arbeitspunkt AP fokussiert. Das von der Oberfläche OF reflektierte Licht wird mit einem zweiten Objektiv O22 gebündelt und auf einen positionsempfindlichen Photodetektor PD gerichtet. Für die beiden Laser L1 und L2 ist eine gemeinsame Steuerelektronik SE vorgesehen, die die beiden Laser mit der gleichen Frequenz betreibt. Mittels einer Trigger- oder Lock-in-Schaltung innerhalb der Steuerelektronik SE werden die Pulse des zweiten Lasers L2 in die Mitte zwischen zwei Pulse des ersten Lasers L1 gesetzt. Bei einer Halbwertsbreite der Laserpulse des ersten Lasers von ca. 500 Nanosekunden und einer nur unwesentlich längeren Abklingzeit des Plasmas, das im Fokus des Lasers L1 am Arbeitspunkt AP erzeugt wird, bleibt für die zeitliche Anordnung des zweiten Laserpulses ein Intervall im Millisekundenbereich. So kann das vom zweiten Laser L2 im Photodetektor PD erzeugte Meßsignal einwandfrei vom Laserpuls des ersten Lasers L1 separiert werden. Der positionsempfindliche Photodetektor PD, zum Beispiel Photodiodenarray liefert ein vom Abstand zum Arbeitspunkt AP abhängiges Meßsignal. Dieses wird in der Regeleinheit RE mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen und erzeugt bei Abweichung ein Steuersignal. Über dieses korrigiert die Nachführleinrichtung NE den Abstand der Anordnung zum Werkstück bzw. zum Arbeitspunkt auf dem Werkstück. Dazu wird eine Relativbewegung in der gesamten Anordnung zum Werkstück in Richtung NR durchgeführt.

Ein Nachführen der Anordnung ist spätestens dann erforderlich, wenn eine horizontale Relativbewegung in Richtung RB zwischen Werkstück und Laseranordnung erfolgt, zum Beispiel um einen zur Strukturierung des

Solarmoduls (Werkstück) erforderlichen Graben quer über das gesamte Werkstück WS durch zumindest eine der Schichten auf der Oberfläche des Moduls. Aufgrund der gekrümmten Oberfläche ist nach einer Relativbewegung RP ein Nachfokussieren durch die Nachführleinrichtung NE erforderlich.

In **Fig. 2** ist die Impulsverteilung der beiden Laser über die Zeit aufgetragen und stellt eine Möglichkeit dar, wie die beiden Laserphasen gekoppelt werden können. Die Laserpulse LP des ersten Lasers sind dabei einschließlich des vom Plasma erzeugten Streulichtes dargestellt und weisen eine Halbwertsbreite T1 von ca. 500 Nanosekunden auf. Zwischen den beiden dargestellten Laserpulsen LP auf der nicht maßstabsgerechten Zeitachse t ist der Puls ML des Meßlasers L2 angeordnet. Auch dessen Pulsbreite P2 liegt in einer vergleichbaren Größenordnung, während der Abstand P3 zwischen den beiden Laserpulsen LP maximal 50 Mikrosekunden beträgt. So ist es möglich, im Photodetektor PD bzw. in der Regeleinheit RE das Meßsignal ML eindeutig von den Laserpulsen LP zu trennen.

Die in der **Fig. 1** dargestellte Anordnung benutzt zur Abstandsbestimmung ein Triangulationsverfahren als Meßmethode und erlaubt gegenüber einer bekannten Laseranordnung mit kapazitiver Abstandsbestimmung eine deutliche höhere Arbeitsgeschwindigkeit bezüglich der Relativbewegung RB. Der Abstand des Lasers L1 vom Arbeitspunkt AP kann bis auf eine Genauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  geregelt werden und erlaubt so scharfe und schmale Schnitte mit einer Breite von zum Beispiel 25  $\mu\text{m}$ . Dies führt bei der Strukturierung des Solarmoduls (WS) zu einem nur geringen Verlust an aktiver Halbleiterschicht.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstückes mit nicht ebener Oberfläche, bei dem ein gepulster Strahl eines ersten Lasers zur Bearbeitung auf das Werkstück gerichtet wird, wobei

- eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und dem ersten Laser durchgeführt wird,
- der Abstand zwischen erstem Laser und Werkstück mit einem optischen Sensor zwischen zwei Laserpulsen bestimmt wird,
- der gemessene Abstand mit einem Sollwert verglichen und gegebenenfalls
- mittels einer Nachführleinrichtung neu auf den Sollwert eingestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein gepulster zweiter Laser und ein positionsempfindlicher Photodetektor als Sensor für die Abstandsmessung verwendet wird, wobei die Frequenzen von erstem und zweitem Laser übereinstimmen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der zweite Laser mittels einer Lock-in-Schaltung mit dem ersten Laser phasenverschoben synchronisiert ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem der zweite Laser mittels eines Spiegels in den Strahlengang des ersten Lasers eingekoppelt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem die Abstandsmessung mittels eines Triangulationsverfahrens erfolgt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem die Abstandsmessung über ein Schneidenverfahren erfolgt.

7. Anordnung zur Laserbearbeitung von Werk-

- stücken mit nicht ebener Oberfläche mit
- einem ersten Laser zur Bearbeitung,
  - Mitteln zur Durchführung einer horizontalen Relativbewegung zwischen Werkstück und erstem Laser,
  - einem Sensor zur optischen Bestimmung des Abstands zwischen Werkstück und erstem Laser,
  - einer Nachführungseinrichtung für eine vertikale Relativbewegung zwischen erstem Laser und Werkstück,
  - einer Regelvorrichtung zur Steuerung der Nachführereinrichtung in Abhängigkeit von einem Meßsignal des Sensors und einem Sollwert und
  - einem Mittel zur Phasenkopplung von optischem Sensor und erstem Laser.
8. Anordnung nach Anspruch 7, bei der der Sensor aus einem zweiten Laser, einer Optik und einem Photodetektor besteht.
9. Anordnung nach Anspruch 8, bei der der Sensor nach einem Triangulationsverfahren arbeitet.

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

25

30

35

40

45

50

55

60

65

**- Leerseite -**

FIG 1

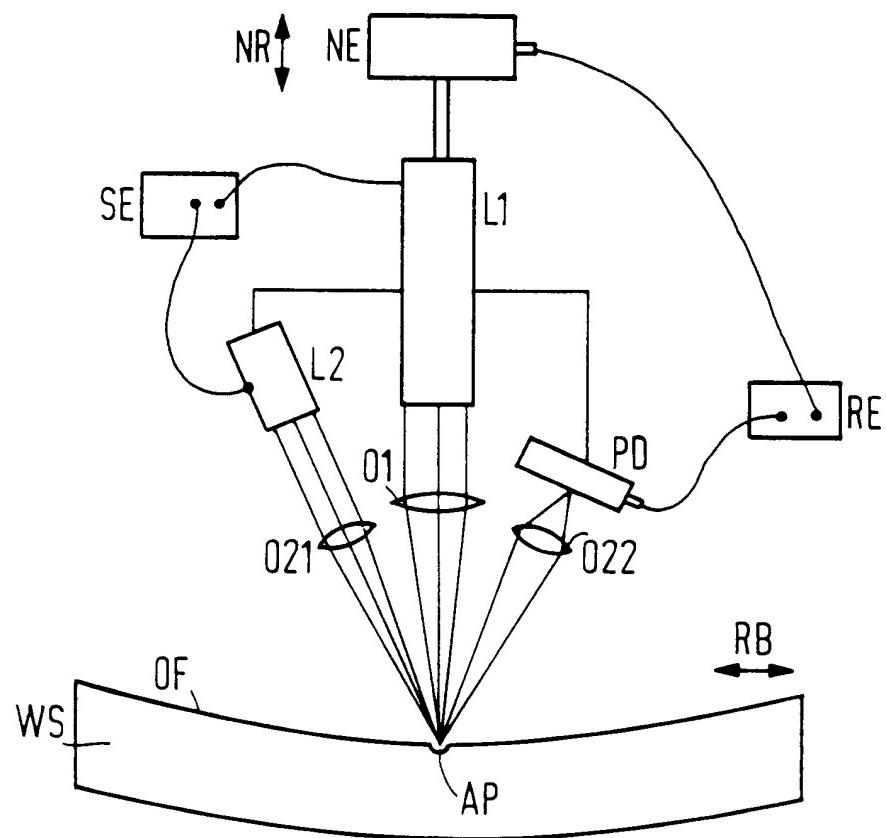
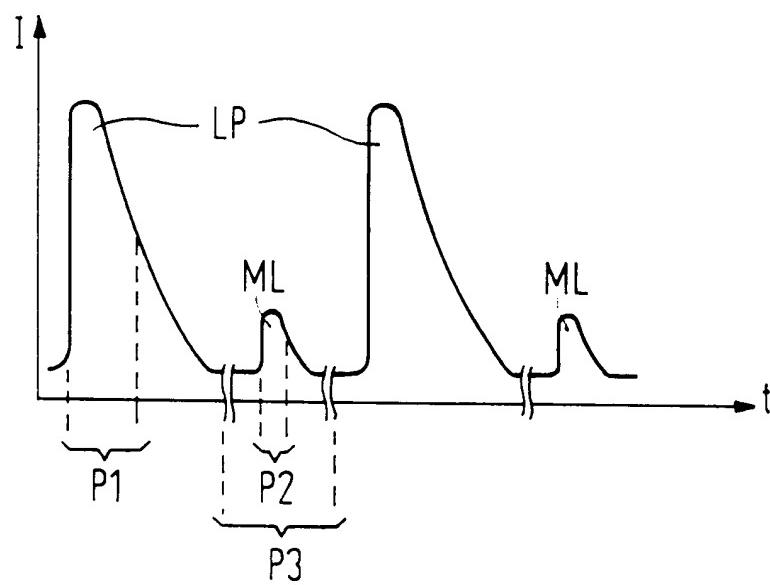


FIG 2



**DERWENT-ACC-NO:** 1993-289266

**DERWENT-WEEK:** 199337

*COPYRIGHT 2009 DERWENT INFORMATION LTD*

**TITLE:** Laser operations on a workpiece with uneven surface where distances between workpiece and laser are measured during intervals between working pulses

**INVENTOR:** GOSLOWSKY H; SCHULZE F

**PATENT-ASSIGNEE:** SIEMENS SOLAR GMBH[SIEI]

**PRIORITY-DATA:** 1992DE-4207169 (March 6, 1992)

**PATENT-FAMILY:**

<b>PUB-NO</b>	<b>PUB-DATE</b>	<b>LANGUAGE</b>
DE 4207169 A1	September 9, 1993	DE

**APPLICATION-DATA:**

<b>PUB-NO</b>	<b>APPL-_DESCRIPTOR</b>	<b>APPL-NO</b>	<b>APPL-DATE</b>
DE 4207169A1	N/A	1992DE-4207169	March 6, 1992

**INT-CL-CURRENT:**

<b>TYPE</b>	<b>IPC DATE</b>
CIPS	B23K26/04 20060101
CIPS	G01S17/88 20060101

**ABSTRACTED-PUB-NO:** DE 4207169 A1

**BASIC-ABSTRACT:**

The method comprises (a) relative motion taking place between the workpiece and the first laser; (b) determining the distance between the first laser and the workpiece by an optical sensor between two laser pulses; (c) comparing the measured distance with a required value; (d) and setting the distance equal to the required value. The appts. includes means for producing horizontal relative motion betwee the workpiece and the first laser, an optical distance measuring sensor, a control system for distance adjustment, and means for phase coupling between the optical sensor and the first laser.

Pref. a pulsed second laser and a position-sensitive photodetector are used for distance measurement, with the pulse frequencies of the first and second laser being the same. The lasers are synchronized with a phase shift by means of a lock-in circuit. The second laser is coupled into the beam path of the first laser by means of a mirror. The distance measurement is based on a triangulation procedure, or alternatively a cutting process is utilised.

**USE/ADVANTAGE** - In laser cutting, boring and welding technologies, for example. It enables distances on irregular and steeply curved surfaces to be measured reliably and with a high degree of accuracy.

**CHOSEN-DRAWING:** Dwg.1/2

**TITLE-TERMS:** LASER OPERATE WORKPIECE UNEVEN  
SURFACE DISTANCE MEASURE INTERVAL  
WORK PULSE

**DERWENT-CLASS:** M23 P55 S02 T06 X24

**CPI-CODES:** M23-D05;

**EPI-CODES:** S02-A03B2; S02-B01; S02-B04;

**SECONDARY-ACC-NO:**

**CPI Secondary Accession Numbers:** 1993-129064

**Non-CPI Secondary Accession Numbers:** 1993-222451

